

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA DE
DISTRIBUCIÓN**

**AUTOR:
WILMER DAVID CURILLO CASCO**

**TUTOR:
SANTIAGO RAÚL ESPINOSA GUALOTUÑA**

Quito, febrero del 2017

Wilmer David Curillo Casco

UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Wilmer Curillo (Y'1988-M04), nació en Otavalo, Ecuador. Bachiller con especialidad en Física y Matemática en el Instituto Tecnológico Otavalo, Ecuador 2006. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo consiste en el modelado y simulación matemática orientados a la ubicación óptima de generación distribuida en el sistema de distribución.

wilmercurillo@gmail.com

Dirigido por:



Santiago Raúl Espinosa Gualotuña (Y'1983-M'10), nació en Quito, Ecuador. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador en 2007. Sus principales áreas de investigación incluyen Operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia, Transacciones Internacionales de Energía, Mercado Eléctrico, Sistemas de Energía Renovable y Eficiencia Energética. Actualmente trabaja en la Agencia de Regulación y Control de Energía del Ecuador, además es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana-Quito Ecuador.

sespinosa@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación de los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2017 Universidad Politécnica Salesiana

Quito-Ecuador

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Santiago Espinosa declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN realizado por Wilmer David Curillo Casco, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero del 2017



.....
Santiago Raúl Espinosa Gualotuña.

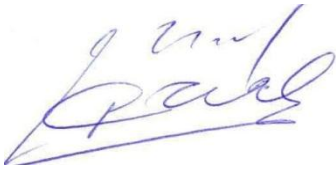
Cédula de identidad: 171454141-2

Cesión de derechos de autor

Yo Wilmer David Curillo Casco, con documento de identificación N° 100309887-6, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....
Nombre: Wilmer Curillo

Cédula: 100309887-6

Fecha: Quito, febrero del 2017

Índice de contenido

Resumen.....	7
Abstract	7
1 Introducción	8
2 Evaluación de los efectos de la Generación Distribuida en el Sistema Eléctrico	9
2.1 Tecnologías empleadas en Generación Distribuida	9
3 Flujo de Potencia (FP).....	10
4 Flujo óptimo de potencia (FOP).....	11
4.1 Optimización a través de la Programación no Lineal (PNL)	11
5 Metodología de resolución.....	12
6 Planteamiento del modelo	13
6.1 Función Objetivo.....	13
6.2 Restricciones	13
6.2.1 Restricciones de igualdad.....	13
6.2.2 Restricciones de desigualdad	13
6.3 Modelo de optimización.....	14
7 Descripción del Caso de Estudio	14
7.1 Generadores	15
7.2 Demanda	15
7.3 Líneas	15
7.4 Transformadores	16
8 Resultados	16
8.1 Sistema en condiciones iniciales.....	16
8.2 Resultados de la optimización.....	17
8.2.1 Integración de las unidades de GD	17
8.2.2 Minimización de las pérdidas de potencia.	17
8.2.3 Perfil de voltaje en cada barra.....	17
8.2.4 Ángulos de voltajes en cada barra.....	17
9 Conclusiones:	18
10 Referencias.....	18
11 Estado del Arte.....	20

Índice de Figuras

Figura 1: Sistema eléctrico de 39 barras.	15
Figura 2: Perfiles de Voltaje.	16
Figura 3: Pérdidas de potencias activa y reactiva.	17
Figura 4 Perfiles de voltaje del sistema.	17
Figura 5: Comparación de los ángulos de voltaje en cada barra.	17
Figura 6: Indicadores del Estado del Arte-Temática	22
Figura 7: Indicadores del Estado del Arte-Solución.	22
Figura 8: Indicadores del Estado del Arte-Formulación del Problema.	22

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de Fuentes de Generación Distribuida.	10
Tabla 2: Clasificación de Fuentes de Generación Distribuida.	10
Tabla 3: Características de generadores.	15
Tabla 4: Demanda del sistema.	15
Tabla 5: Características de las líneas.	16
Tabla 6: Características de los transformadores.	16
Tabla 7: Localización de las unidades de GD.	17
Tabla 8: Matriz del estado del arte 1.	20
Tabla 9: Matriz del estado del arte 2.	21

UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Resumen

La demanda creciente de energía eléctrica a nivel mundial ha generado un gran interés en la Generación Distribuida (GD) ya que se puede usar en lugares alejados de las grandes ciudades o en sitios en los cuales no existan recursos hídricos para la generación centralizada y lograr satisfacer la demanda, uno de sus mayores beneficios potenciales ofrecidos es el de minimizar pérdidas en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) y a su vez en las redes de distribución (RD). La ubicación de los GD toma importancia, ya que si se ubica indebidamente los GD en una RD conducen a un aumento de pérdidas de potencia, y en muchas ocasiones podría desestabilizar al SEP. Por lo expuesto, el presente artículo pretende ubicar de manera óptima la GD en RD, considerando la minimización de las pérdidas de potencia activa en un SEP. Para evaluar los resultados se realiza la comparación de un primer caso de estudio que consiste en evaluar el sistema sin la introducción de los GD y un segundo caso de estudio introduciendo GD.

Para encontrar la solución óptima al problema planteado, se procederá con la modelación matemática la cual será resuelta a través de la utilización del General Algebraic Modeling System General (GAMS).

Abstract

The growing demand for electricity worldwide has generated great interest in Distributed Generation (DG), since they can be used in places far from large cities or in places where there are no water resources for centralized generation. One of the greatest potential benefits offered is to minimize the losses in the Electrical Power Systems (EPS) and in turn in the distribution networks (DN). The correct location of DG assumes the importance that if DG are improperly placed in an EPS. For this purpose, what is established in this article is to minimize the losses of active power in an EPS containing (39) bars. The comparison is made by modeling the EPS in the first case without the introduction of DG and in the second case introducing DG, for this solution and the modeling is done using the General Algebraic Modeling System General (GAMS), since the results also It will visualize the improvement of the voltage profiles in the bars which will guarantee us a high stability and reliability in the operation of EPS.

Keywords: Reduction of active power losses, electrical power system, distribution networks, distributed generation systems, GAMS.

Palabras Clave: Reducción de pérdidas de potencia activa, sistema eléctrico de potencia, redes de distribución, sistemas de generación distribuida, GAMS.

1 Introducción

En la actualidad, la mayoría de las redes de distribución (RD) operan con diseños y configuraciones de tipo radial, en los cuales el flujo de potencia es unidireccional, pero las modificaciones y cambios a nivel mundial de las estructuras de los mercados eléctricos, han traído nuevos desafíos al momento de diseñar nuevas RD o a su vez repotenciarlas a causa de la expansión de consumidores y la penetración de nuevas tecnologías de producción de energía eléctrica como la Generación Distribuida (GD)[1].

Las GD puede basarse en fuentes de energía alternativas de pequeña y mediana potencia de 5kW hasta 100MW[2], la GD utiliza tecnologías vinculadas a energías renovables como la energía eólica, solar e hídricas, pero también se emplean fuentes no renovables, como generadores diésel, generadores de gas natural, pilas de combustible, etc.[3][2], éstas centrales se ubican muy próximas a los consumidores por lo que se pueden conectar a las RD o en las instalaciones internas del consumidor [4], en la actualidad los GD han reemplazado en una escala considerable a la generación centralizada de electricidad[5], el uso masivo de GD reduce en gran proporción el costo de producción de electricidad, si son GD renovables reducen la contaminación ambiental brindándonos energía limpia y compatible con el medio ambiente.

Los efectos positivos que brindan los GD son verdaderamente importantes, pueden descongestionar la red, cambiar direcciones de potencia, estabilizar el voltaje, disminuir costos, disminuir pérdidas, etc., pero también se pueden reflejar efectos adversos ya que la mayoría de RD en la actualidad son radiales en las cuales el flujo de potencia es unidireccional[6] y su infraestructura no está diseñada para soportar la inyección de potencia en sitios en los cuales se implementan GD.

En muchas partes del mundo, donde no hay red eléctrica, la GD puede ser la única fuente de energía. Por otra parte, en regiones bien dotadas de redes de suministro de energía, son

pocas las que contemplan la sustitución total de la conexión a la red por la total dependencia de la GD, y es este aspecto de la integración de la GD en la red que ha dado lugar a una serie de cuestiones que deben ser resueltas[7].

A pesar de los innumerables beneficios de la GD existen situaciones adversas a los intereses de la ingeniería eléctrica ya que la introducción sin previo estudio referente a las necesidades pueden repercutir en la operación de la infraestructura tradicional de las RD[8], cuando la penetración de GD es alta, las unidades de GD alteran no solo a las RD sino también pueden afectar a las Redes de Transmisión (RT), en efecto, la penetración sin previo estudio de GD en los sistemas eléctricos puede influir en la estabilidad del sistema, alterando así, el ángulo, la frecuencia y la estabilidad del voltaje[9], aspecto por el cual, se afectaría la confiabilidad de la operación de los sistemas eléctricos.

Con estos antecedentes, este artículo pretende determinar técnicamente la ubicación de generadores distribuidos para insertarlos en un sistema eléctrico mallado de 39 barras, a fin de verificar sus beneficios considerando para el efecto el cálculo de las pérdidas en el sistema eléctrico, los perfiles de voltaje y garantizando la operación del sistema eléctrico.

En relación a la temática, en [3], [8] sus autores proponen estudios sobre los impactos que pueden ocasionar las diferentes tecnologías de GD integradas al sistema eléctrico, en [9], se propone un método basado en dos factores: análisis de la continuación del flujo de potencia y determinación de las barras con las voltaje más sensible al voltaje de colapso.

En [3], se hace un análisis en el sistema eléctrico mediante el software NEPLAN y el método ampliado de Newton-Raphson llegando a la conclusión de que su ubicación precisa y el tamaño son vitales para reducir las pérdidas de potencia y mejorar la estabilidad de voltaje del sistema.

Así mismo en [10], sus autores presentan un

método analítico eficiente (AE) que integra el algoritmo de flujo óptimo de potencia (FOP) para desarrollar un nuevo método, AE-FOP que resuelve efectivamente las limitaciones globales del sistema para disminuir pérdidas de potencia y mejorar la estabilidad de la voltaje, los estudios propuestos anteriormente tienen como objetivo común disminuir las pérdidas de potencia y mejorar los perfiles de voltaje en los sistemas eléctricos utilizando GD, es por eso que este documento se propone resolver la problemática mencionada, sujeto a las restricciones inherentes de la operación del sistema eléctrico, cuyo modelo matemático propuesto será resuelto utilizando el software denominado General Algebraic Modeling System General (GAMS).

2 Evaluación de los efectos de la Generación Distribuida en el Sistema Eléctrico

Las evaluaciones de los efectos y el comportamiento de la GD en los sistemas eléctricos involucran una gran cantidad de estudios, en los que se consideran múltiples escenarios de operación por ejemplo las horas pico de consumo, las horas de consumo bajo y mediano. En los sistemas con contribución mayoritaria de centrales hidroeléctricas los escenarios aumentan porque se deben tomar aspectos característicos de las épocas secas de verano y las épocas lluviosas de invierno.

Estos efectos pueden ser analizados mediante la comparación obtenida para cada escenario antes y después de la introducción de la GD en el sistema eléctrico.

La GD tiene el amplio potencial de reducir las emisiones y aumentar la dependencia de las fuentes de energías alternativas y, por lo tanto, participar en la diversificación energética[3]. También ayuda a proporcionar energía de reserva durante intervalos de tiempo en los que se demande energía evitando la inversión en grandes centrales eléctricas y líneas de transmisión, teniendo también como consecuencia la reducción de las pérdidas de potencia de transmisión y

distribución.

Además, la GD mejora los perfiles de voltaje y el factor de carga, lo que minimiza el número de reguladores de voltaje necesarios, los condensadores y sus elevados costos de mantenimiento o reparación[11].

Otro objetivo importante de la GD es la oportunidad de explotar la integración de diferentes portadores de energía, con el objetivo de ahorro de energía y mejora de la eficiencia del sistema eléctrico, haciendo transferencias de energía de una compañía distribuidora a otra donde sea más conveniente. Por lo tanto, se prevé un intercambio de energía entre diferentes portadores de energía con un aumento previsible de la demanda eléctrica. Estas hipótesis, asociadas a la apertura del mercado eléctrico y a la integración de diferentes tecnologías, implican un impacto significativo en la operación del sistema eléctrico[12].

Por otra parte, estos beneficios se compensan con las situaciones adversas que se pueden dar en el sistema eléctrico, ya que la integración de GD no es sencilla, el sistema eléctrico puede resultar con mayores pérdidas de potencia activa y reactiva porque la GD está instalada cerca de los centros de carga[13], reflejándose un mayor nivel de cortocircuito y percibiéndose desviaciones de voltaje, ya que el nivel de penetración de la GD puede causar sobrevoltajes. En la mayoría de casos las pérdidas y afectaciones al sistema eléctrico se dan porque previo a la conexión la GD no se realizaron estudios que avalen sus beneficios y las afectaciones.

2.1 Tecnologías empleadas en Generación Distribuida

Muchas tecnologías de GD utilizan combustibles fósiles como las turbinas de combustión, celdas de combustión y los motores de combustión interna, las mismas que emiten emisiones tóxicas al medio ambiente, pero por el tamaño reducido su emisión es baja respecto a las grandes centrales convencionales, en la Tabla 1 se muestran las tecnologías empleadas[14].

Tabla 1: Clasificación de Fuentes de Generación Distribuida.

<i>Tecnología</i>	<i>Potencia Nominal</i>
Turbinas a gas de ciclo combinado	35-100MW
Motores de combustión interna	5kW-10MW
Turbinas de combustión	1-100MW
Micro-turbinas de combustión	35kW-1MW
Biomasa, basados en gasificación	100kW-20MW
Celdas de combustible, ácido fosfórico	200kW-2MW

En la Tabla 2 se muestran tecnologías relativamente nuevas y que son muy atractivas para la ingeniería eléctrica y para los activistas ambientalistas, pues, se promueven con gran interés porque el impacto hacia el medio ambiente es mínimo[14].

Tabla 2: Clasificación de Fuentes de Generación Distribuida.

<i>Tecnología</i>	<i>Potencia Nominal</i>
Pequeñas Hidros	1-100MW
Micro Hidros	25kW-1MW
Turbinas Eólicas	200W-3MW
Arreglos Fotovoltaicos	20W-100kW
Solar térmica, receptor central	1-10MW
Solar térmica, sistema Lutz	10-80MW
Energía del océano	100kW-1MW

3 Flujo de Potencia (FP)

El cálculo del FP en los sistemas eléctricos tiene el propósito de describir los flujos de carga que circulan en los sistemas eléctricos, la razón del FP es que los sistemas eléctricos son complejos y necesitan procedimientos computacionales para poder planificar, diseñar y operar los sistemas de potencia, el FP en los SEP se determina mediante el voltaje en cada barra y las impedancias de las líneas que interconectan las barras, dicho calculo permite encontrar: magnitud y ángulo de los voltajes, flujos de potencia activa y reactiva, reajustes de taps de los transformadores, las pérdidas en los sistemas eléctricos, etc.,[15].

El estudio del FP obliga conocer los parámetros iniciales de cada elemento que conforma el SEP, para ello es indispensable

conocer la matriz de admitancia (Ybarra), esta matriz abarca los datos de las impedancias de las líneas de transmisión[16]. Para obtener la admitancia total conformada por todos los elementos que se interconectan al sistema usaremos las ecuaciones (1) y (2) determinado así la conductancia y la susceptancia. A su vez, la Ybarra está conformada por la admitancia mutua (3) y la admitancia propia descrita en (4) y la matriz Ybarra mostrada en (5).

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (1)$$

Donde:

G : Conductancia.

R : Resistencia.

X : Reactancia.

$$B = \frac{X}{R^2 + X^2} \quad (2)$$

Donde:

B : Susceptancia.

R : Resistencia.

X : Reactancia.

$$Y_{in} = -Y_{in} \angle \theta_{in} \quad (3)$$

$$Y_{ii} = -\sum_{j=1}^N -Y_{in} \angle \theta_{in} \quad (4)$$

$$Y_{in} = \begin{bmatrix} 0 & -Y_{in} & \dots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & 0 & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & 0 & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \dots & -Y_{in} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Con el objetivo de obtener el valor de potencia en cada barra, hay que saber la inyección de corriente que se está haciendo mediante la matriz que se observa en (6)[17].

$$\begin{bmatrix} I_{ij} & \dots & I_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i Y_{ii} & -V_n Y_{in} & \dots & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & \ddots & -V_n Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -V_n Y_{in} & \ddots & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & \dots & -V_n Y_{in} & V_i Y_{ii} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Posterior a la resolución de (6), la ecuación (7) muestra la corriente que será inyectada en cada barra del sistema, quedando de la siguiente manera.

$$I_i = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \cdots Y_{in}V_{in} = Y_{ii}V_i + \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n, i \in N \quad (7)$$

Además, se sabe que la potencia es el producto del voltaje y la corriente en cada barra tenemos de donde surge la ecuación (89), en la cual están unificadas la potencia activa y la reactiva.

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_nV_i| \angle \theta_{in} + \delta_n - \delta_i \quad (8)$$

Fundamentalmente si se realiza la expansión a la ecuación (8) anterior surgen ecuaciones independientes de potencia activa y reactiva, dichas ecuaciones son las que permiten obtener los flujos que circulan por cada barra del sistema, de esta manera dando paso a la resolución del problema de FP y que además se logra identificar los tipos de barras que el SEP puede poseer y estas son: Barra de voltaje, la cual contiene el valor constante de la magnitud del voltaje a la cual también se adhiere un elemento el cual inyecta potencia activa de manera constante al sistema. Barra oscilante, dicha barra funciona como referencia del valor de ángulo para todo el sistema, en la mayoría de casos se asocia a un grupo de generadores de gran tamaño los cuales tienen la capacidad de compensar en caso de que haya desvío de potencia en la operación del SEP y la barra de carga, no posee generación y nos da a conocer la potencia activa y el factor de potencia por medio de un registro de datos[16].

Por la complejidad y la no linealidad de las funciones que permiten la resolución de un FP se han creado métodos iterativos los cuales facilitan su resolución, entre los más comunes se citan; el método de Newton-Raphson, método de la Bisección, método de la Secante, entre otros, sin embargo, cualquier método que se aplique únicamente reflejan de valores y resultados de carácter eléctrico; de tal manera que un FP no considera la operación eficiente de un SEP por lo que la problemática se centra en la optimización de recursos para la transmisión de energía desde los centros de generación hasta los sitios de consumo, por lo tanto, la necesidad de tener

un sistema optimo y eficiente conduce al cálculo de un Flujo óptimo de Potencia (FOP), con el cual se pueden fijar aspectos de minimización o maximización de recursos relacionados a la producción y entrega de energía[16], [18].

4 Flujo óptimo de potencia (FOP)

Actualmente existen muchas técnicas para resolver un FOP, dichas técnicas se subcategorizan en los métodos heurísticos y la optimización definida por la matemática clásica, estas técnicas son abarcadas por poderosas herramientas computacionales u optimizadores los mismos que nos permiten resolver problemas de optimización de manera rápida y confiable, uno de estos es el optimizador GAMS, es un sistema de optimización y modelado matemático que compila el lenguaje y un conjunto de solucionadores de alto rendimiento, el optimizador GAMS puede realizar modelados de programación lineal, programación entera programación entera mixta, programación no lineal, etc., esta última citada es la que se aplica en este artículo para cumplir con el propósito de resolución del problema[15].

El FOP es muy importante porque hace que el sistema eléctrico entregue la potencia adecuada al consumidor despachando sus generadores de manera que se pueda maximizar o minimizar una función objetivo sujeta a restricciones que se relacionan a la operación del sistema eléctrico, de tal manera se entiende que el FOP es un problema de optimización no lineal mixta multivariable multidimensional y multirestrictiva con interacción con variables continuas y discretas [19].

4.1 Optimización a través de la Programación no Lineal (PNL)

La optimización consiste en encontrar el valor óptimo de las variables de una función objetivo que satisfagan las restricciones planteadas, la optimización se la puede realizar mediante la PNL. En [20] se describe a la PNL como un conjunto de resoluciones en un sistema con condiciones desiguales o

iguales sujeta a restricciones que involucran variables desconocidas que conduzcan a maximizar o minimizar una función objetivo, la solución de la PNL se sujeta a condiciones de operación del sistema, de tal manera que se pueda obtener una respuesta acorde a las restricciones y satisfacer la función objetivo, los componentes de un flujo óptimo de potencia tienen condiciones que son establecidas por las variables de control las mismas que cambian según las características que tengan los problemas planteados, esto se puede ver en la ecuación (9) descrita en [21], ayuda a establecer nuestro modelo matemático de flujo óptimo de potencia, la cual generaliza la función objetivo y sus respectivas restricciones.

$$\begin{cases} \min f = f(x, u) \\ \text{s. a. } g(x, u) = 0 \\ h(x, u) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

La ecuación (10) es descrita de la siguiente manera: x es la variable que se va a controlar, que normalmente representa la potencia activa del generador, la voltaje de la máquina, la relación del transformador de regulación de la voltaje de carga, el ángulo de fase; u , es la variable de estado, que normalmente representa la potencia activa en un punto de equilibrio, amplitud de voltaje, etc.

$f(x, u)$, es la función objetivo de un problema que normalmente representa el costo de generación, pérdidas de potencia en la red, desviación del voltaje en las barras, etc.; $g(x, u)$ es la restricción de igualdad, pueden ser balances de potencia activa o reactiva en las barras; $h(x, u)$ son las restricciones de desigualdad, usualmente representa la restricción de amplitud de voltaje, ángulo de fase y potencia activa y reactiva de los generadores asociados al sistema. Sin embargo por la complejidad que representa realizar la optimización en el problema de este trabajo el método utilizado para su resolución es la Programación no lineal de enteros mixtos (MINLP), este método se refiere a la programación matemática con variables continuas y

discretas y no lineales en la función objetivo y sus restricciones[22].

El uso de MINLP es un planteamiento natural de la formulación de problemas donde es necesario optimizar simultáneamente la estructura del sistema (discreta) y parámetros (continua). De manera algebraica se denota de la siguiente manera.

$$\begin{cases} \min f = f(x, u) \\ \text{s. a. } g(x, u) \leq 0 \\ x \in X, y \in Y \text{ integer} \end{cases} \quad (10)$$

A diferencia de la PNL la MINLP posee variables continuas y discretas las mismas que para el modelo planteado el conjunto de elementos en y son enteros.

5 Metodología de resolución

A fin de resolver el problema de optimización, se procede con la aplicación del siguiente algoritmo de resolución:

Algoritmo de Resolución
Paso 1: INICIO-Datos del SEP
Paso 2: Matriz de admitancias
Pase 3: Cálculo de la matriz de admitancias
Paso 4: Proceso, Optimización
Condiciones Iniciales.
Variable de decisión U_{DGi}
Restricciones de igualdad
$PG_i - PD_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$
$QG_i - QD_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$
Restricciones de desigualdad
$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$
$\delta_{i-min} \leq \delta_i \leq \delta_{i-max}$
$PG_{min} \leq PG_{nom} \leq PG_{max}$
$QG_{min} \leq QG_{nom} \leq QG_{max}$
$\sum_1^i U_{DGij} \leq N_{GDmax}$
Paso 5: Visualización, Resultados
$PL = \sum_{i=1}^n PG_i - \sum_{j=1}^n PD_j$
Paso 6: FIN

El optimizador utilizado para este problema es el GAMS, calificado como un alto lenguaje de programación para resolución de problemas matemáticos, posee un conjunto de solvers cada uno direccionado a los diferentes tipos de problemas que puedan existir, uno de los solver es el Interior Point Optimizer for large scale nonlinear programming (IPOPT) [23], que es utilizado

en este trabajo, es ideal para resolver problemas de optimización a gran escala que contengan algoritmos relacionados con MINLP.

6 Planteamiento del modelo

El objetivo del presente trabajo es minimizar las pérdidas de potencia activa en un SEP utilizando GD, para ello se adquieren los datos de un sistema eléctrico de 39 barras descrito en [24], los cuales utilizaremos para correr los flujos de potencia en el primer caso sin la implementación de GD y el otro caso implementando unidades de GD que serán resultado de la optimización, para poder realizar la comparación respectiva.

6.1 Función Objetivo

La función objetivo se describe en la ecuación (12), la cual pretende minimizar la pérdida de potencia activa del sistema.

Para el efecto se considera tanto las cargas e inyecciones en cada nodo del sistema, permitiendo el balance nodal, claro está que para que se cumpla debemos restringirla con las condiciones descritas en el siguiente numeral.

$$PL = \sum_{i=1}^n PG_i - \sum_{i=1}^n PD_i \quad (11)$$

Dónde:

PL : Potencia activa de pérdidas.

PG_i : Potencia generada.

PD_i : Potencia consumida o potencia de carga

6.2 Restricciones

El modelado matemático tiene como propósito demostrar que la implementación de la GD logra disminuir las pérdidas de potencia activa, para lo cual se debe tomar en cuenta una serie de restricciones inherentes a la operación del sistema, las cuales se detallan a continuación [25].

6.2.1 Restricciones de igualdad

6.2.1.1 Balance de potencia activa y reactiva

Las ecuaciones (12) y (13), garantizan que la demanda del sistema sea atendida, de tal

modo, que la potencia producida por el sistema eléctrico y las fuentes de GD no excedan la potencia que el sistema necesita, realizando un balance en cada barra.

$$PG_i - PD_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (12)$$

$$QG_i - QD_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (13)$$

Donde:

PG_i, QG_i : Potencia activa y reactiva generada en i.

PD_i, QD_i : Potencia de demanda activa y reactiva en i.

V_k : Voltaje en el nodo k.

Y_{ik} : Magnitud de la admitancia de Ybarra.

δ_i : Ángulo de voltaje en el nodo i.

δ_k : Ángulo de voltaje en el nodo k.

θ_{ik} : Ángulo de la admitancia de Ybarra.

6.2.2 Restricciones de desigualdad

6.2.2.1 Los límites de voltaje

El modelo de optimización que sirve para el flujo de potencia debe incluir un mecanismo para mantener la magnitud del voltaje dentro de una banda restrictiva, que garantice la estabilidad del sistema.

Durante el proceso de cálculo del flujo de potencia, los límites establecidos para este proceso comúnmente en redes eléctricas oscilan entre 0,9 pu y 1,05 pu según lo explican en [26], en efecto, las variaciones de voltaje deben estar dentro del rango mencionado, para cumplir lo descrito se usará la ecuación (14).

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad (14)$$

Donde:

$V_{min}; V_{max}$: Voltaje mínimo y máximo.

V_i : Voltaje nominal.

6.2.2.2 Límites de ángulos de los voltajes

En la ecuación (15) se determinan los límites de los ángulo de voltaje de cada barra, pues, el ángulo de voltaje en cada barra es un

margen adicional de seguridad, en la norma europea EN50160 descrita en [27] menciona que la variación mínima que puede sufrir el ángulo del voltaje en cada barra es el 6% y el límite máximo es del 10 %.

$$\delta_{i-min} \leq \delta_i \leq \delta_{i-max} \quad (15)$$

Donde:

$\delta_{i-min}; \delta_{i-max}$: Ángulo mínimo y máximo.
 δ_i : Ángulo nominal.

6.2.2.3 Límites de potencia

Dado que la capacidad de las fuentes de GD está inherentemente limitada por los recursos energéticos, es necesario mantener la potencia generada entre los niveles máximos y mínimos, multiplicadas por la ecuación de las variables binarias de decisión, esto se muestra en (16), (17), (18) Y (19).

$$PG_i \leq PG_i \max * U_{GD_i} \quad (16)$$

$$PG_i \geq PG_i \min * U_{GD_i} \quad (17)$$

$$QG_i \leq QG_i \max * U_{GD_i} \quad (18)$$

$$QG_i \geq QG_i \min * U_{GD_i} \quad (19)$$

Donde:

$PG_{min}; PG_{max}; QG_{min}; QG_{max}$: Potencia activa y reactiva de generación, mínima y máxima.
 $PG_i; QG_i$: Potencia activa y reactiva despachada por cada de generador ubicado en el nodo i.
 U_{GD_i} : Variable binaria de decisión.

6.2.2.4 Número máximo de GD a integrarse

Esta restricción determina el número máximo de fuentes de GD que pueden ingresar a operar, según las necesidades del sistema eléctrico, la misma que se muestra en la Ecuación (20).

$$\sum_1^i U_{GD_i} \leq N_{GDmax} \quad (20)$$

Dónde:

U_{GD_i} : Variable binaria de decisión.
 N_{GDmax} : Número máximo de fuentes de GD.

De tal manera que para hacer uso de la ecuación de variables binarias de decisión que dan una señal de encendido o apagado de las unidades, mostrando el valor de 1 si se integró

o el valor de 0 si no se integró, la ecuación (21) modelará lo antes descrito.

$$U_{GD_i} \in \{0,1\} \quad (21)$$

6.3 Modelo de optimización

Con base a lo todo lo descrito, el modelo de optimización a ser resuelto por GAMS es el siguiente:

Función Objetivo

$$PL = \sum_{i=1}^n PG_i - \sum_{i=1}^n PD_i$$

Sujeto a:

Ecuaciones de Balance de Potencia Activa y Reactiva

$$PG_i - PD_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$

$$QG_i - QD_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$

Límites de Voltaje

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax}$$

Límites de los Ángulos de los Voltajes

$$\delta_{i-min} \leq \delta_i \leq \delta_{i-max}$$

Límites de Potencia

$$PG_i \leq PG_i \max * U_{GD_i}$$

$$PG_i \geq PG_i \min * U_{GD_i}$$

$$QG_i \leq QG_i \max * U_{GD_i}$$

$$QG_i \geq QG_i \min * U_{GD_i}$$

Variable binaria de decisión

$$U_{GD_i} \in \{0,1\}$$

Número máximo de unidades de GD

$$\sum_1^i U_{GD_i} \leq N_{GDmax}$$

7 Descripción del Caso de Estudio

El sistema de 39 barras descrito en[24] consta de 10 generadores, 19 cargas, 34 líneas

y 12 transformadores en la Figura 1 se muestra el diagrama unifilar de dicho sistema, es un modelo simplificado del sistema de transmisión en el área de Nueva Inglaterra en el noreste de los EE.UU.

La frecuencia nominal del sistema es de 60 Hz y el voltaje de la red es de 345 kV (voltaje nominal). Para las barras a un nivel de voltaje diferente, se han asumido los siguientes voltajes nominales para el modelo desarrollado.

- Barra 12: 138 kV
- Barra 20: 230 kV
- Barra 30-Barra 38: 16.5 kV

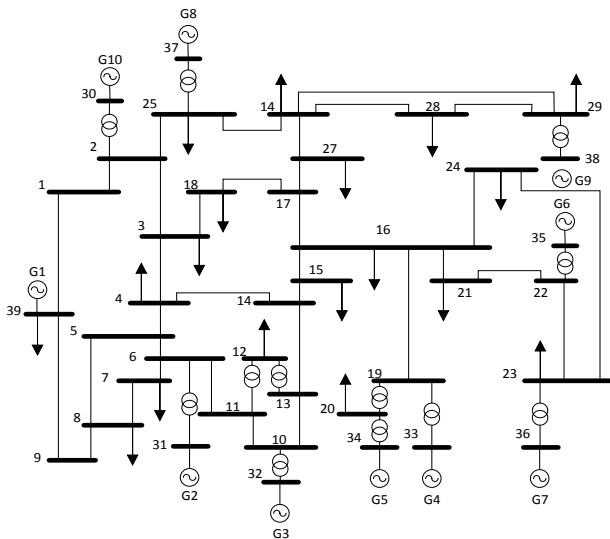


Figura 1: Sistema eléctrico de 39 barras.

7.1 Generadores

El generador 1 representa la interconexión con el resto del sistema de transmisión y, por lo tanto, está conectado directamente al nivel de 345 kV. Todos los demás generadores están conectados a través de transformadores.

El generador 2 es el elemento oscilante del sistema, por lo tanto la magnitud de voltaje y el ángulo de voltaje son dados (0.982 p.u., 0.0 grados). Para los otros generadores, se suministran la potencia activa y la magnitud de tensión controlada en sus terminales. Los datos indican en la Tabla 3.

Tabla 3: Características de generadores.

Generador	Ubicación	Tipo de Bara	Potencia (MW)
G1	Barra 39	PV	1000
G2	Barra 31	Slack	0
G3	Barra 32	PV	650
G4	Barra 33	PV	632
G5	Barra 34	PV	508
G6	Barra 35	PV	650
G7	Barra 36	PV	560
G8	Barra 37	PV	540
G9	Barra 38	PV	830
G10	Barra 30	PV	250

7.2 Demanda

Las cargas no dependen del voltaje, pero tienen una demanda constante de potencia activa y reactiva. Los datos de carga (potencia activa P y potencia reactiva Q) se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Demanda del sistema.

Carga	Ubicación	P (MW)	Q (Mvar)
L 03	Barra 03	322	2.4
L 04	Barra 04	500	184
L 07	Barra 07	233.8	94
L 08	Barra 08	522	176
L 12	Barra 12	7.5	88
L 15	Barra 15	320	153
L 16	Barra 16	329	32.3
L 18	Barra 18	158	30
L 20	Barra 20	628	103
L 21	Barra 21	274	115
L 23	Barra 23	247	94.6
L 24	Barra 24	309	-92.2
L 25	Barra 25	224	47.2
L 26	Barra 26	139	17
L 27	Barra 27	291	75.5
L 28	Barra 28	206	27.6
L 29	Barra 29	283	26.9
L 31	Barra 31	9.2	4.6
L 39	Barra 39	1104	250

7.3 Líneas

Los datos de las líneas se dan en por unidad (p.u.) con base de 100MVA como se representa en la Tabla 5, con voltaje nominal de 345 kV y una frecuencia nominal de 60 Hz. La longitud de cada línea en el modelo se ha estimado con el supuesto de que la reactancia por longitud es de 0,3 / km.

Tabla 5: Características de las líneas.

Ni	Nf	R(pu)	X(pu)	B(pu)	Pload (pu)	Qload (pu)
1	2	0,00350	0,04110	0,69870	0,00000	0,00000
2	3	0,00100	0,02500	0,75000	0,00000	0,00000
3	4	0,00130	0,01510	0,25720	3,22000	0,02400
4	5	0,00700	0,00860	0,14600	5,00000	1,84000
5	6	0,00000	0,01810	0,00000	0,00000	0,00000
6	7	0,00130	0,02130	0,22140	0,00000	0,00000
7	8	0,00110	0,01330	0,21380	2,33800	0,84000
8	9	0,00080	0,01280	0,13420	5,22000	1,76000
9	10	0,00080	0,01290	0,13820	0,00000	0,00000
10	11	0,00020	0,00260	0,04340	0,00000	0,00000
11	12	0,00080	0,01120	0,14760	0,00000	0,00000
12	13	0,00060	0,00920	0,11300	0,07500	0,88000
13	14	0,00070	0,00820	0,13890	0,00000	0,00000
14	15	0,00000	0,02500	0,00000	0,00000	0,00000
15	16	0,00040	0,00460	0,07800	3,20000	1,53000
16	17	0,00230	0,03630	0,38040	3,29000	0,32300
17	18	0,00100	0,02500	1,20000	0,00000	0,00000
18	19	0,00040	0,00430	0,07290	1,58000	0,30000
19	20	0,00040	0,00430	0,07290	0,00000	0,00000
20	21	0,00000	0,02000	0,00000	6,28000	1,03000
21	22	0,00160	0,04350	0,00000	2,74000	1,15000
22	23	0,00160	0,04350	0,00000	0,00000	0,00000
23	24	0,00090	0,01010	0,17230	2,47500	0,84600
24	25	0,00180	0,02170	0,36600	3,08600	-0,92200
25	26	0,00090	0,00940	0,17100	2,24000	0,47200
26	27	0,00070	0,00890	0,13420	1,39000	0,17000
27	28	0,00160	0,01950	0,30400	2,81000	0,75500
28	29	0,00080	0,01350	0,25480	2,06000	0,27600
29	30	0,00030	0,00590	0,06800	2,83500	0,26900
30	31	0,00070	0,00820	0,13190	0,00000	0,00000
31	32	0,00130	0,01730	0,32160	0,09200	0,04600
32	33	0,00070	0,01380	0,00000	0,00000	0,00000
33	34	0,00070	0,01420	0,00000	0,00000	0,00000
34	35	0,00090	0,01800	0,00000	0,00000	0,00000
35	36	0,00080	0,01400	0,25650	0,00000	0,00000
36	37	0,00060	0,00960	0,18460	0,00000	0,00000
37	38	0,00000	0,01430	0,00000	0,00000	0,00000
38	39	0,00220	0,03500	0,36100	0,00000	0,00000
39	40	0,00050	0,02720	0,00000	11,04000	2,50000

7.4 Transformadores

Los datos de los transformadores se dan en por unidad (p.u.) como se representa en la Tabla 6 basada en la potencia base de 100MVA. Se ha supuesto que el grupo vectorial de todos los transformadores es YNy0, con el fin de obtener resultados de los ángulos de voltaje.

Tabla 6: Características de los transformadores.

Trafo	Ubicación	R (pu)	X (pu)	Mag. Tr. (pu)
Tr 1	Barra 11	0.0016	0.0435	1.0060
Tr 2	Barra 13	0.0016	0.0435	1.0060
Tr 3	Barra 31	0.0000	0.0250	1.0700
Tr 4	Barra 32	0.0000	0.0200	1.0700
Tr 5	Barra 33	0.0007	0.0142	1.0700
Tr 6	Barra 34	0.0009	0.0180	1.0090
Tr 7	Barra 35	0.0000	0.0143	1.0250
Tr 8	Barra 36	0.0005	0.0272	1.0000
Tr 9	Barra 37	0.0006	0.0232	1.0250
Tr 10	Barra 30	0.0000	0.0181	1.0250
Tr 11	Barra 38	0.0008	0.0156	1.0250
Tr 12	Barra 20	0.0007	0.0138	1.0600

Todos los datos mostrados en esta sección servirán para realizar la simulación en el Dig SILENT, así se podrá conocer los datos del flujo de potencia del sistema, posterior a esto se realizara la optimización mediante el GAMS, los resultados obtenidos de los dos software se realizará un análisis comparativo y llegar a conclusiones relacionadas con la operación del sistema.

8 Resultados

8.1 Sistema en condiciones iniciales.

En este caso se realiza el cálculo de flujo de potencia únicamente con la función objetivo sujeta a las restricciones inherentes que posee el sistema sin sobrecargar al sistema es decir con una demanda baja, para comprobar que se están realizando las cosas de manera correcta se procede a correr el flujo de potencia en primera instancia mediante el simulador DigSILENT posteriormente para comprobar que el modelo de optimización está cumpliendo con su función, bajo condiciones relajadas y sin la intervención de ninguna fuente de GD procedemos simular el flujo de potencia en el optimizador GAMS y se comparan los perfiles de voltaje, luego de su comparación se obtiene el siguiente resultado.

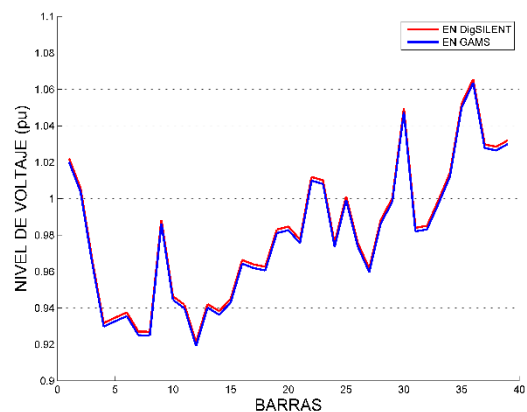


Figura 2: Perfiles de Voltaje.

El resultado muestra que los valores son similares, esto garantiza el correcto funcionamiento del modelo planteado y del optimizador sin considerar la integración de fuentes de GD al sistema eléctrico.

8.2 Resultados de la optimización

Posterior a la comprobación se procede a realizar la optimización del caso de estudio planteado, en esto se considera el sistema eléctrico a plena carga es decir en el punto mas alto de la curva de consumo, para tener la garantía de que el sistema muestre confiabilidad en horas de consumo masivo.

8.2.1 Integración de las unidades de GD

Una vez resuelto el problema de optimización, se obtiene las unidades de GD que entran en operación y las cuales son ubicadas en las barras 25, 27, 28, 36 y 37. Las potencias activas y reactivas que se despachan se reflejan en la Tabla 4.

Tabla 7: Localización de las unidades de GD.

Barras	Unidades integradas de GD	
	P_g (pu)	Q_g (pu)
25	0.5	0.25
27	0.5	0.25
28	0.5	0.25
36	0.5	0.25
37	0.5	0.25

8.2.2 Minimización de las pérdidas de potencia.

Como resultado importante de la optimización del modelo en la Figura 3 se describen las pérdidas de potencia, se puede notar que la minimización es evidente, de esta manera se garantiza la operación óptima del sistema.

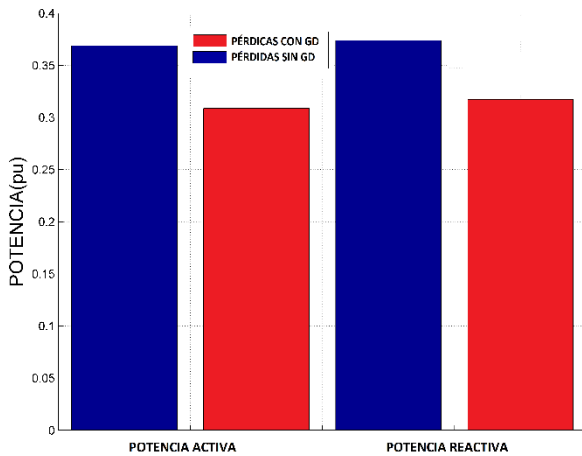


Figura 3: Pérdidas de potencias activa y reactiva.

8.2.3 Perfil de voltaje en cada barra

La ubicación correcta de las fuentes de GD es vital para que se puedan mejorar los perfiles de voltaje en las barras, es así, debido a que las potencias inyectadas por la GD permiten redistribuir las potencias antes referidas en todo el sistema. En la Figura 4 se aprecia la mejora de los perfiles de voltaje manteniéndose dentro de los límites permitidos.

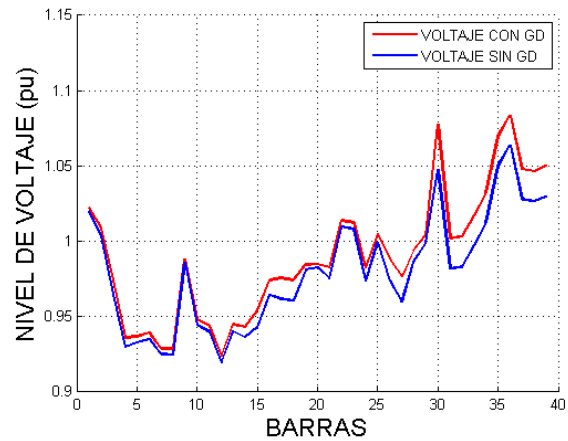


Figura 4 Perfiles de voltaje del sistema.

8.2.4 Ángulos de voltajes en cada barra

Como resultado adicional se denota la mejora en la variación de los ángulos de los voltajes en cada barra, permitiendo que el sistema se mantenga estable durante la operación bajo condiciones máximas de demanda.

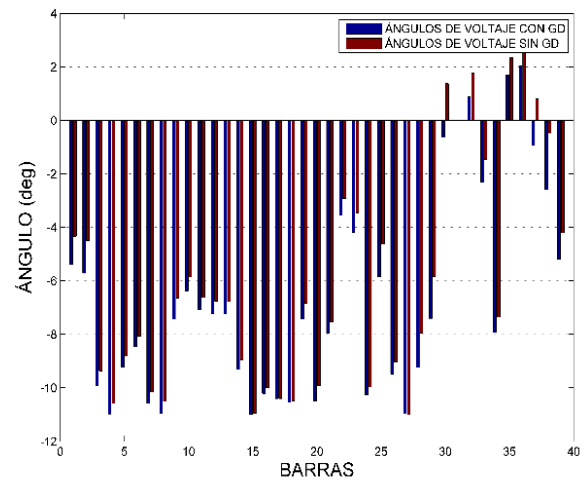


Figura 5: Comparación de los ángulos de voltaje en cada barra.

9 Conclusiones:

La minimización de pérdidas de potencia en el sistema del caso de estudio es evidente, existen muchos factores los que contribuyen para que los resultados sean reflejados en las gráficas. Un estudio previo, análisis mediante simulaciones, correcta formulación del algoritmo, etc., son algunos aspectos que se pueden citar para lograr un buen diseño y operación de todo sistema en el que se requiera la integración de fuentes de GD.

El modelo propuesto fue desarrollado con éxito en el cual se pueden constatar varias mejoras en las características del sistema eléctrico, esto ya que la determinación de la ubicación de las fuentes de GD fue correcta y para llegar a la solución óptima el sistema eléctrico considera las limitaciones y condiciones establecidas arbitrariamente.

La conexión de GD al sistema eléctrico siempre es eficiente cuando los problemas operativos del sistema eléctrico son resueltos o mejorados, es aún más eficiente si las GD provienen de fuentes primarias renovables, de esta manera se reducen las emisiones tóxicas hacia el ambiente, también pueden contribuir en la disminución de los costos de construcción y de operación de los sistemas eléctrico ya que son fuentes ubicadas próximas a las sitios de consumo y la necesidad de construir y mantener redes de transmisión serían minimizadas.

En el caso del estudio resuelto, el sistema eléctrico puede mantenerse en condiciones óptimas de operación, manteniendo sus parámetros dentro de los límites aunque la potencia de demanda aumente, esto sucede porque cumple con las condiciones establecidas, pero hay que recalcar que tiene un límite establecido de fuentes de GD que van a ser integradas ya que si se integran las fuentes sin control alguno se tendrían variaciones anormales en el sistema y el efecto de la GD en el sistema eléctrico sería negativo.

Se recomienda que al modelo propuesto sea complementado con mayores restricciones para el modelado de estabilidad, a fin de determinar aspectos de detalle y conclusiones factibles de la GD en los sistemas eléctricos.

10 Referencias

- [1] M. Piumetto, "Study of the influences and contributions of the Generation Distribution to control and optimize The operation of the electrical distribution networks characteristic of the Argentine Republic," 2015.
- [2] L. Hongkai, X. Chenghong, S. Jinghui, and Y. Yuexi, "Green power generation technology for distributed power supply," *2008 China Int. Conf. Electr. Distrib.*, no. 4, pp. 1–4, 2008.
- [3] V. Vita, T. Alimardan, and L. Ekonomou, "The Impact of Distributed Generation in the Distribution Networks' Voltage Profile and Energy Losses," *2015 IEEE Eur. Model. Symp.*, pp. 260–265, 2015.
- [4] A. D. Pilehvarani, M. Hakimzadeh, M. J. Far, and R. Sedaghati, "Application of GAMS and GA in the Location and Penetration of Distributed Generation," vol. 8, no. 11, pp. 1752–1755, 2014.
- [5] A. R. Wallace and G. P. Harrison, "Planning for optimal accommodation of dispersed generation in distribution networks," *Manager*, no. 63, pp. 12–15, 2003.
- [6] F. Gonzáles Longatt, "Venezuelan Congress of Networks and Electric Energy," 2007.
- [7] M. A. Golkar, "Distribited generation and competition in electric distribution market," *IEEE Syst. J.*, pp. 558–563, 2009.
- [8] N. Mourad, "Impact of Increased Distributed Photovoltaic Generation on Radial Distribution Networks," pp. 31–34, 2016.
- [9] H. Hedayati, S. A. Nabaviniaki, and A. Akbarimajd, "A new method for placement of DG units in distribution networks," *2006 IEEE PES Power Syst. Conf. Expo. PSCE 2006 - Proc.*, no. February 2016, pp. 1904–1909, 2006.
- [10] K. . b Mahmoud, N. . Yorino, and A. . Ahmed, "Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems for Loss Minimization," *IEEE*

- Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 960–969, 2016.
- [11] V. K. Shrivastava, O. P. Rahi, V. K. Gupta, and S. K. Singh, “Optimal location of distribution generation source in power system network,” *2012 IEEE 5th Power India Conf. PICONF 2012*, pp. 0–5, 2012.
 - [12] B. Delfino, “Modeling of the integration of distributed generation into the electrical system,” *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet.*, vol. 1, pp. 170–175, 2002.
 - [13] A. Molina-Garcia, R. Mastromauro, T. Garcia-Sanchez, S. Pugliese, M. Liserre, and S. Stasi, “Reactive Power Flow Control for PV Inverters Voltage Support in LV Distribution Networks,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2016.
 - [14] F. Gonzalez-Longatt, “Technologies used in Distributed Generation,” p. 14, 2008.
 - [15] C. O. A Costa, “Resolution of the load flow problem,” vol. 2, pp. 124–245, 2002.
 - [16] S. R. Espinosa Gualotuña, “Analysis of the restriction of carbon dioxide emissions in the optimal dispatch of the thermal units of the Ecuadorian generator park,” 2015.
 - [17] C. Vasquez, “Optimal location of distributed generation sources based on the voltage profile of electrical distribution systems.” Quito, Ecuador, p. 22, 2016.
 - [18] K. V Kumar and M. P. Selvan, “Planning and Operation of Distributed Generations in Distribution Systems for Improved Voltage Profile,” *2009 IEEE PES Power Syst. Conf. Expo.*, vol. 620015, pp. 1–7, 2009.
 - [19] X. Yu, “The Optimal Power Flow Calculation of Power System Based on the Annealing Algorithm,” *Energy Power Eng.*, vol. 05, no. 04, pp. 797–802, 2013.
 - [20] R. Y. W. Hua, H Sasaki, J Kubokawa, “An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure,” vol. 11, pp. 12–45, 1997.
 - [21] Z. Liu, Y. Jun, and S. Qi, “Optimal power flow research on distributed network considering distributed generation,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, vol. 2016-Septe, no. Ciced, pp. 10–13, 2016.
 - [22] M. R. Bussieck and A. Pruessner, “Mixed-integer nonlinear programming,” *SIAG/OPT Newsl. Views News*, vol. 14, no. 1, pp. 19–22, 2003.
 - [23] GAMS Development Corporation, “IPOPT and IPOPTH:” [Online]. Available: www.gams.com.
 - [24] Powerfactory and Digsilent, “39 Bus New England System,” vol. V15,2, pp. 1–18, 2014.
 - [25] K. M. Sharma, K. P. Vittal, and P. Seshagiri, “A heuristic approach for distributed generation sources location and capacity evaluation in distribution systems,” *TENCON 2008-2008 IEEE Reg. 10 Conf.*, pp. 1–6, 2008.
 - [26] IEEE Power & Energy Society, *IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.*, vol. 2009, no. June. 2009.
 - [27] V. Smith, “A review of the new CELEC STANDARD EN 50160,” *Syst Biol*, vol. 57, no. 4, pp. 660–663, 2008.

11 Estado del Arte

Tabla 8: Matriz del estado del arte 1.

UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN																								
DATOS				TEMATICA						FORMULACION DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCION PROPUESTA	
ITEM	AÑO	TITULO DEL ARTICULO	REFERENCIA	Distributed Generation (DG) Technologies	Impact of DG on distribution networks	Minimization of power losses	Voltage Stability	Power Losses	Resolution Software	Voltage Stability	Power Losses	Voltage control	Cost minimization	Application of software	Power balances	Power limits of DG	Limits of angles and voltages in each bus	Power generated by DG	Optimal flow of power	Locate the critical buses	Minimization of power losses	Optimal location of DG	Optimal location of DG	Improve voltage profile and stability
1	1997	An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure	\cite{Hua-Sasaki1997}						✖					✖										
2	2002	Modeling of the integration of distributed generation into the electrical system	\cite{Delfino2002}	✖			✖			✖			✖		✖	✖	✖	✖			✖	✖	✖	
3	2002	Resolution of the load flow problem	\cite{Costa-Olmedo2002}					✖	✖		✖	✖	✖	✖			✖							✖
4	2003	Mixed-integer nonlinear programming	\cite{Bussieck2003}						✖					✖										
5	2003	Planning for optimal accommodation of dispersed generation in distribution networks	\cite{Wallace2003}	✖	✖			✖			✖				✖		✖	✖		✖		✖	✖	✖
6	2006	A new method for placement of DG units in distribution networks	\cite{Hedayati2006}	✖	✖			✖			✖						✖		✖		✖	✖	✖	
7	2007	Venezuelan Congress of Networks and Electric Energy	\cite{Gonzales-Longatt2007}	✖	✖		✖		✖						✖	✖	✖		✖		✖	✖		
8	2008	Technologies used in Distributed Generation	\cite{Gonzales-Longatt2008}	✖	✖			✖						✖										
9	2008	Green power generation technology for distributed power supply	\cite{Hongkai2008}	✖	✖		✖		✖		✖		✖	✖		✖		✖				✖	✖	
10	2008	A heuristic approach for distributed generation sources location and capacity evaluation in distribution systems	\cite{Sharma2008}	✖		✖				✖	✖		✖		✖	✖	✖	✖	✖		✖	✖	✖	✖
11	2008	A review of the new CELEC STANDARD EN 50160	\cite{Smith2008}		✖			✖	✖			✖		✖										
12	2009	Distributed generation and competition in electric distribution market	\cite{Golkar2009}		✖	✖	✖			✖			✖			✖	✖			✖	✖	✖	✖	✖
13	2009	IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality	\cite{IEEE2009}						✖		✖			✖	✖	✖				✖		✖	✖	✖
14	2009	Planning and Operation of Distributed Generations in Distribution Systems for Improved Voltage Profile	\cite{Kumar2009}	✖		✖		✖	✖		✖		✖		✖	✖			✖	✖			✖	
15	2012	Optimal location of distribution generation source in power system network	\cite{Shrivastava2012}	✖	✖	✖	✖	✖		✖					✖		✖	✖	✖	✖	✖	✖	✖	

Tabla 9: Matriz del estado del arte 2.

UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN																									
	DATOS			TEMATICA					FORMULACION DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCION PROPUESTA			
ITEM	AÑO	TITULO DEL ARTICULO	REFERENCIA	Distributed Generation (DG) Technologies	Impact of DG on distribution networks	Minimization of power losses	Voltage Stability	Power Losses	Resolution Software	Voltage Stability	Power Losses	Voltage control	Cost minimization	Application of software	Power balances	Power limits of DG	Limits of angles and voltages in each bus	Power generated by DG	Optimal flow of power	Locate the critical buses	Minimization of power losses	Optimal location of DG	Optimal location of DG	Improve voltage profile and stability	
16	2013	The Optimal Power Flow Calculation of Power System Based on the Annealing Algorithm	\cite{Yu2013}			✗	✗	✗		✗	✗				✗				✗		✗			✗	
17	2014	Application of GAMS and GA in the Location and Penetration of Distributed Generation	\cite{Pilehvaram2014}	✗			✗		✗		✗			✗			✗	✗	✗						
18	2014	39 Bus New England System	\cite{Powerfactory2014}			✗	✗	✗	✗		✗	✗		✗	✗	✗	✗		✗		✗		✗	✗	
19	2015	Analysis of the restriction of carbon dioxide emissions in the optimal dispatch of the thermal units of the Ecuadorian generator park	\cite{Espinosa2015}	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗			✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
20	2015	Study of the influences and contributions of the Generation Distribution to control and optimize The operation of the electrical distribution networks characteristic of the Argentine Republic	\cite{Piumetto2015}	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗				✗	✗		✗				✗	✗	✗	✗
21	2015	The Impact of Distributed Generation in the Distribution Networks' Voltage Profile and Energy Losses	\cite{Vita2015}		✗	✗	✗			✗	✗		✗				✗	✗			✗				✗
22	2016	Impact of Increased Distributed Photovoltaic Generation on Radial Distribution Networks	\cite{Mourad2016}		✗			✗			✗	✗				✗	✗								
23	2016	Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems for Loss Minimization	\cite{Mahmoud2016}	✗	✗	✗		✗			✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗			
24	2016	Optimal location of distributed generation sources based on the voltage profile of electrical distribution systems	\cite{Vasquez2016}	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗			✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗
25	2016	Optimal power flow research on distributed network considering distributed generation	\cite{Liu2016}	✗		✗	✗	✗			✗		✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗
26	2016	Reactive Power Flow Control for PV Inverters Voltage Support in LV Distribution Networks	\cite{Molina-Garcia2016}		✗			✗	✗		✗	✗		✗		✗	✗								
27	2016	IPOPT and IPOPTH:	\cite{Gams Corp2016}						✗					✗											
			CANTIDAD:	15	15	12	13	16	12	8	18	8	8	11	14	15	17	10	12	7	14	14	14	12	

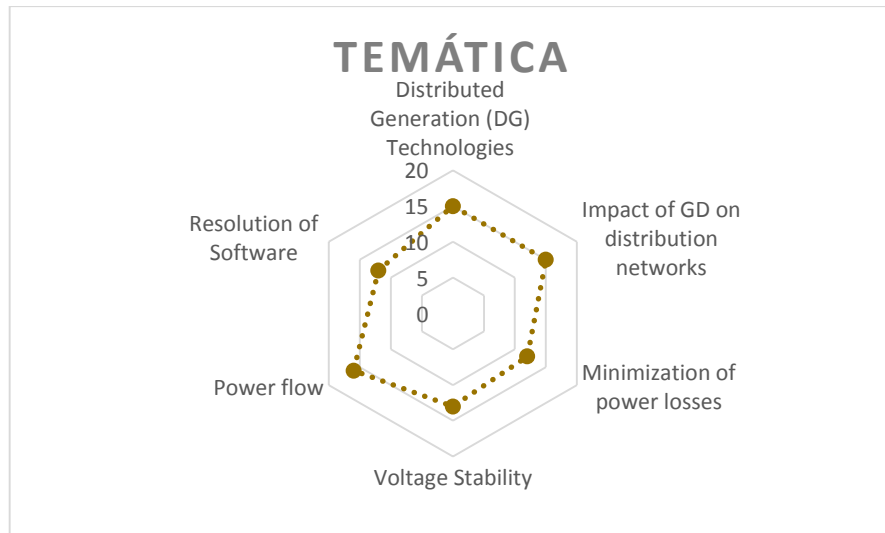


Figura 6: Indicadores del Estado del Arte-Temática

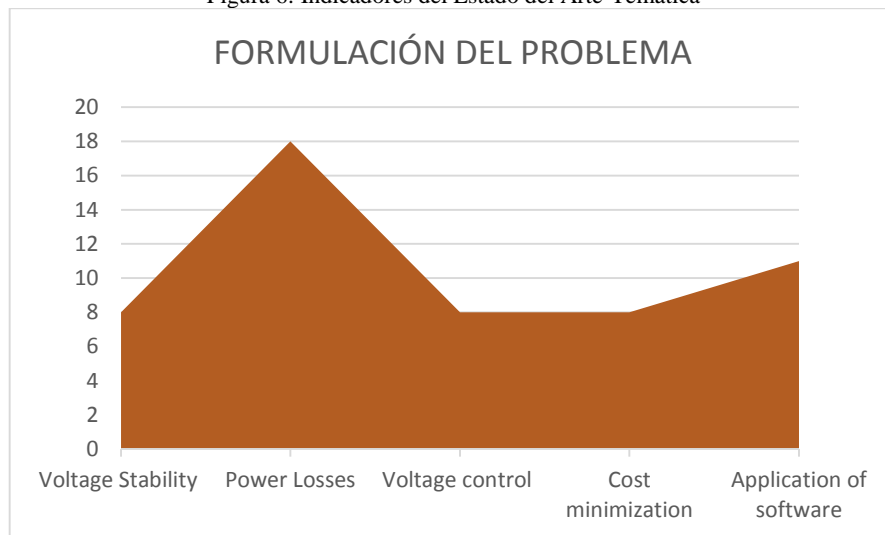


Figura 7: Indicadores del Estado del Arte-Solución.

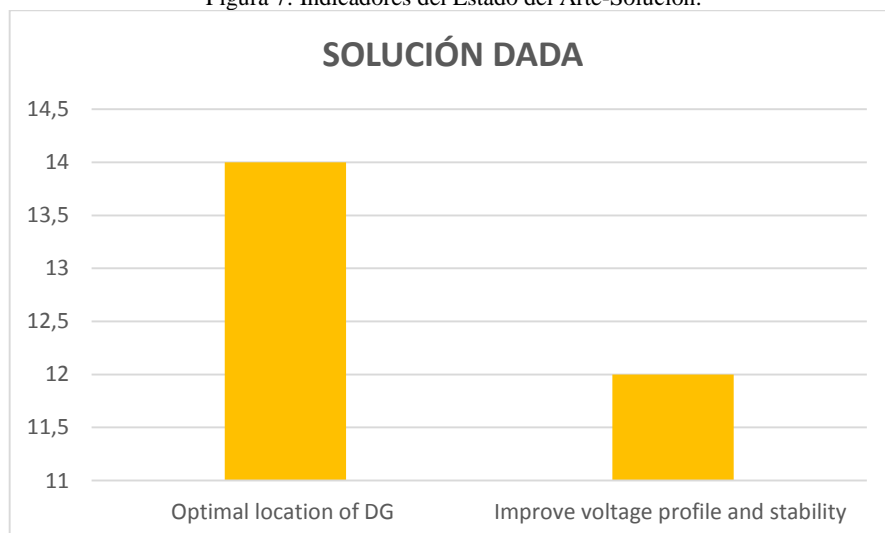


Figura 8: Indicadores del Estado del Arte-Formulación del Problema.

